

文章编号: 0258-7025(2010)04-1082-06

# 五棱镜扫描法检测大口径近红外干涉仪准直波前

刘兆栋<sup>1</sup> 于丽娜<sup>2</sup> 韩志刚<sup>1</sup> 陈磊<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094; <sup>2</sup> 中国电子科技集团第 45 所, 北京 101601)

**摘要** 为了保证大口径近红外干涉仪的测试精度, 必须严格控制其出射波前的准直性。采用五棱镜扫描系统将干涉仪的出射波前分割成若干个子波前, 记录每个子波前在 CCD 上所成光斑质心的相对位置, 计算得到各个子波前的法线方向以重构被测波前, 从而实现对出射波前准直性的检测。实验测量了 210 mm 口径的近红外干涉仪准直物镜水平方向上的出射波前, 计算重构了被测波前。分析了实验系统误差对于测试结果的影响。该方法成本低、精度高, 特别适用于大口径近红外波前的准直性检测。

**关键词** 光学测量; 准直波前; 五棱镜扫描; 干涉仪; 近红外

中图分类号 TH744.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103704.1082

## Measurement of the Wavefront Collimation of a Large Aperture Near-Infrared Interferometer Using a Scanning Pentaprism System

Liu Zhaodong<sup>1</sup> Yu Lina<sup>2</sup> Han Zhigang<sup>1</sup> Chen Lei<sup>1</sup>

<sup>1</sup> School of Electrical Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210094, China  
<sup>2</sup> The 45th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Beijing 101601, China

**Abstract** The wavefront collimation of the large aperture near-infrared interferometer must be controlled strictly. Scanning pentaprism system is introduced to divide the wavefront of the interferometer into a series of sub-wavefronts, and the relative positions of the spot centroid according to every sub-wavefront are recorded on the CCD camera. The normal directions of every sub-wavefront are obtained to reconstruct the tested wavefront, thus the collimation test of the wavefront can be realized. The wavefront in the horizontal direction of the collimation lens of a 210 mm aperture near-infrared interferometer is tested and reconstructed. The effect of system error on the experimental results is analyzed. This method is of low cost and high accuracy, and is particularly applicable to the collimation test of a large aperture near-infrared wavefront.

**Key words** optical testing; collimated wavefront; scanning pentaprism; interferometer; near-infrared

### 1 引 言

大口径光学系统在天文光学、空间光学、地基空间目标探测与识别、惯性约束聚变 (ICF) 等高新技术领域都得到了越来越广泛的应用<sup>[1,2]</sup>。这些大型光学系统均采用了很多大口径高精度的光学元件, 本课题组正在研制大口径近红外数字波前干涉仪, 对此类大口径光学元件透射或反射波前进行精确的测试和评价。该干涉仪出射波前的准直性将会直接

影响到其自身的测试精度, 因此必须对大口径近红外干涉仪的出射波前进行测试。

目前对大口径光学系统波前检测的方法主要有哈特曼检测法<sup>[3]</sup>、夏克-哈特曼检测法<sup>[4]</sup>、剪切干涉法<sup>[5]</sup>和子孔径拼接法<sup>[6]</sup>几大类。用哈特曼法检测出射波前, 每检测一个系统就要制造一个匹配的哈特曼光阑, 成本很高; 夏克-哈特曼检测法只能用于检测会聚球面波而不能检测准直波前; 剪切干涉法必

收稿日期: 2009-04-27; 收到修改稿日期: 2009-07-07

作者简介: 刘兆栋(1984—), 男, 博士研究生, 主要从事光干涉测量方面的研究。E-mail: liuzhaodong6@hotmail.com

导师简介: 陈磊(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光学计量测试与光电智能化仪器等方面的研究。

E-mail: chenleiy@126.com(通信联系人)

须引入至少和被检系统口径相当且材料均匀性高的剪切板,造价昂贵;而普遍采用的子孔径拼接法利用小口径干涉仪,用干涉方法分别检测大口径光学镜面的各个子孔径后将这些子孔径的参考面拼接到同一个参考面上,从而恢复出全口径波面的完整面形。其机械结构非常复杂,传递误差和积累误差很大,算法难度大。五棱镜扫描法<sup>[7,8]</sup>利用五棱镜使光线转折 $90^\circ$ 角的特性,将准直过程中的纵向调焦转化为横向对准,具有结构简单的特点。本文采用五棱镜扫描法将中心波长为 $1053\text{ nm}$ 的大口径干涉仪准直物镜某一方向上的出射波前划分成有限个子波前进行扫描,通过计算分析各采样点的斜率变化重构被测波前,并对此波前进行评价分析。

## 2 原 理

五棱镜扫描法的基本原理<sup>[9]</sup>如图1所示。采用一个五棱镜沿着直导轨扫描准直透镜出射波前的某一直径,导轨方向与准直透镜的光轴垂直,五棱镜与光栅尺相连,其位置坐标可以精确地记录下来。五棱镜沿导轨移动的步距非常小,相当于把准直透镜的出射波前分割成了很多个子波前,通过记录每个子波前的法线在 CCD 上所成光斑质心的相对位置可以得到每个子波前的斜率,即被测波前在每个采样点的一阶导数值。对这些导数值进行积分,就可以还原被测波前。

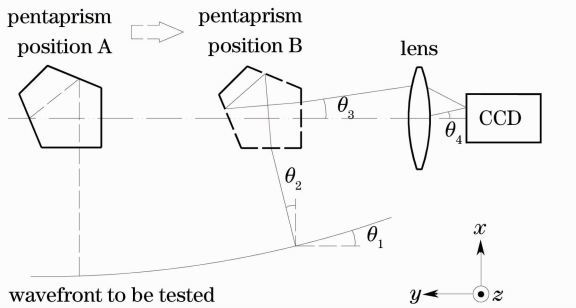


图1 五棱镜扫描法原理示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the scanning pentaprism test system

五棱镜在扫描过程中各采样点的位置坐标为 $y_0, y_1, y_2, \dots, y_n$ ,被测波前在每一采样点切线的斜率值 $k(y)$ 可以表示为

$$\begin{cases} k(y_0) = W'(y_0) \\ k(y_1) = W'(y_1) \\ \vdots \\ k(y_n) = W'(y_n) \end{cases} \quad (1)$$

当五棱镜在位置A时,被测波前中心点的出射

光线经过五棱镜转向 $90^\circ$ ,再经过平行光管物镜(Lens)会聚到CCD上。以该光线作为基准,当五棱镜在位置B时,被测波前上另一点的光线同理也会聚在CCD上,在CCD上所成的两个光斑的质心位置的偏移量为 $\Delta c$ ,而这两束光夹角为 $\theta_3$ ,通过图1中三角关系可知: $\theta_3 = \theta_4 = \theta_2 = \theta_1$ , $\theta_1$ 为被测波前上一点切线与 $y$ 轴的夹角,因此可得

$$\frac{\Delta c}{f} = \tan \theta_4 = \tan \theta_1 = k, \quad (2)$$

式中 $f$ 为平行光管物镜的焦距, $k$ 为被测波前上某一点切线的斜率值。由(2)式可知,只要测得CCD靶面上光斑的质心偏移就可以得到波前上各采样点的斜率,而这些斜率值就是波前在采样点的一阶导数值。通过一重积分

$$W(y) = \int k(y) dy, \quad (3)$$

就可求得被测波前在五棱镜扫描方向上的线分布。

由于干涉仪准直系统的调整误差,需要对出射波前进行消倾斜处理,而选取不同的基准点造成的影响是波前的倾斜程度不同,这对消倾斜后的波前结果不会产生影响。

## 3 实 验

### 3.1 实验装置

实验对 $210\text{ mm}$ 大口径近红外干涉仪的中心波长为 $1053\text{ nm}$ 的出射波前进行研究,实验装置如图2所示。

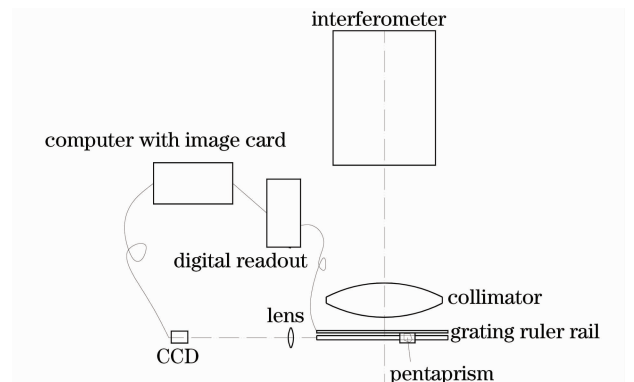


图2 五棱镜扫描系统实验装置图

Fig. 2 Scanning pentaprism test system device

实验装置主要由4部分组成:光源及准直系统、扫描转向系统、成像系统和计算处理系统。实验采用Newfocus公司生产的波长为 $1053\text{ nm}$ 的半导体激光器作为光源,利用一个 $210\text{ mm}$ 口径的准直物镜和显微物镜构建准直系统对激光光源进行扩束准直。扫描转向系统由高精度五棱镜和平直度很好的

精密导轨组成。实验中采用的导轨长 500 mm,五棱镜口径为 8 mm。五棱镜主截面的中心高度与准直物镜的光轴高度平齐。成像系统由口径为 55 mm,焦距为 550 mm 的平行光管物镜,敏通公司生产的 MTV-2360CA 型 CCD 摄像头和图像采集卡等组成。在用 CCD 探测时,由于五棱镜较小,造成的衍射现象会影响质心的探测精度。在程序编制时要去掉衍射的次极大,只留下主极大,以方便求取质心坐标。计算处理系统把五棱镜在导轨上运动过程中的相对位置读入计算机,并同时把扫描过程中 CCD 采集到的光斑图记录下来,算出质心坐标并由此重构准直波前。

### 3.2 实验步骤及结果

由于原理算法中要求得到的各采样图光斑质心坐标是以 CCD 像素为单位的,而最后得到的波面图需以实际长度为单位,因此需要标定出在实验中 CCD 每个像素所对应的物理长度。调整好准直光路后,把五棱镜移至与出射波前光轴重合,CCD 放置在一维微分头平移台上,通过转动调节螺杆实现 CCD 水平移动。在监视器上观察,使光斑位于监视器边缘处开始采样,调整架每次移动 0.2 mm,每次采样 6 次,以消除随机误差。直至光斑移到监视器的另外一端。通过计算记录到的光斑图得到 CCD 上每个像素的标定长度为  $6.3 \mu\text{m}$ 。

用五棱镜在运动导轨上以 2 mm 的采样间隔实现对准直物镜出射波前的扫描采样,在每个采样点重复采样 6 次并取平均,尽量避免环境误差对光斑的影响,用 CCD 和计算机记录下光斑图像。根据实验原理的算法,必须得到每个采样点的质心坐标,再通过拟合算法求出波面的斜率系数,进而拟合波面方程。对 CCD 离散采样数据的质心采用质心算法<sup>[10]</sup>来计算,其数学描述为

$$X_c = \frac{\sum_{i,j}^{L,M} x_i P_{i,j}}{\sum_{i,j}^{L,M} P_{i,j}}, \quad Z_c = \frac{\sum_{i,j}^{L,M} z_j P_{i,j}}{\sum_{i,j}^{L,M} P_{i,j}}, \quad (4)$$

式中  $L, M$  为质心计算窗口的宽度,以 CCD 的像素宽度为单位,  $x_i, z_j$  分别为 CCD 各像素中心点的坐标,  $P_{i,j}$  为第  $i, j$  个 CCD 像素接收的光能量,  $X_c, Z_c$  为探测到的质心坐标值。用质心算法公式可以得到出射波面上各采样点在  $x, z$  方向上的光斑质心坐标。

由相对于被测波前中心位置的采样点质心位置求出各采样点的质心偏差,从而得到各点的径向斜率,接着对测得的斜率数据作最小二乘法拟合,得到

被测波前拟合系数,再用所得系数重构消倾斜后的出射波前峰谷值 PV 为  $1.465\lambda$ ,均方根误差 RMS 为  $0.411\lambda$ ,波前如图 3 所示。

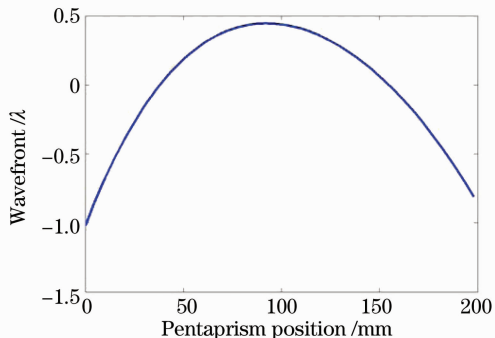


图 3 拟合得到的干涉仪准直波前(消倾斜后)

Fig. 3 Fitted profile of the collimated wavefront (tilt removed)

## 4 误差分析

采用五棱镜转向系统扫描被测波前时,由五棱镜引入的误差会使光束的出射方向发生改变。这些误差包括:五棱镜在沿导轨移动过程中随导轨产生 3 个方向的转动而引入的运动误差,五棱镜角度误差和平面度误差。扫描过程中光斑的漂移和 CCD 器件本身的误差等也将影响最终测量的精度。

### 4.1 系统误差容限

根据所采用的算法以及原理图 1 可知,当出射光线偏离时,使得  $\theta_3$  增加了微偏角  $\Delta\theta_3$ ,因而  $\theta_1$  也增加了  $\Delta\theta_1$ ,从而使波面上采样点的斜率改变,恢复出来的波面和原始波面就会产生偏差。而  $\Delta\theta_1$  的最小分辨角由 CCD 和平行光管物镜决定。由于实验中所采用的 CCD 最小分辨率为  $6 \mu\text{m}$ ,平行光管物镜焦距为 550 mm,即有

$$\tan \theta_{\min} = \frac{6 \mu\text{m}}{550 \text{ mm}} = 1.091 \times 10^{-5}, \quad (5)$$

则  $\theta_{\min} \approx 2.25''$ 。所以只要  $\Delta\theta < 2.25''$ ,系统所引入的误差即可忽略。

### 4.2 五棱镜微量转动对出射光束方向的影响

采用棱镜调整理论来计算分析五棱镜在运动过程中分别绕  $x, y, z$  3 个坐标轴转动对出射光线的影响。根据图 1 中所示的坐标系分别设五棱镜运动过程中的俯仰角、滚转角、偏摆角为  $\alpha, \beta, \gamma$  ( $i, j, k$  为单位向量),利用小角度近似可得

$$\begin{cases} \Delta\alpha = -j' + \alpha k' \\ \Delta\beta = \beta^2 i' - j' - \beta k', \\ \Delta\gamma = -j' \end{cases} \quad (6)$$

由(6)式和图 4(a)可以看出五棱镜在导轨上的偏摆(绕图 1 中的  $z$  轴转动),即五棱镜在主截面上的微量转动不会影响出射光线的方向。图 4(b)表明当五棱镜在导轨上存在俯仰角时(绕图 1 中的  $y$  轴转动),其出射光线的  $x$  分量不会发生变化,而其  $y$  和  $z$  分量均发生变化,即出射光线在  $yz$  平面上发生变化,在探测器的接收面上表现为光点在竖直方向上的起伏,由于算法中只涉及到了出射光线在水平方向上的变化,因而五棱镜在导轨上的俯仰对出射波前的测量没有影响。图 4(c)表明若五棱镜在导轨上运动时存在滚转角(绕图 1 中的  $x$  轴转动),

出射光线 3 个方向的分量均发生变化。五棱镜的滚转引起出射光线方向在探测器接收面的  $x$  方向和  $z$  方向的变化。同理只需考虑  $x$  方向的变化。当滚转角为  $\beta$  时,引起的  $x$  方向的斜率误差系数为

$$k_{px} = \frac{-\sin^2 \beta}{-\cos \beta} = \tan \beta \sin \beta \approx \beta^2, \quad (7)$$

根据系统容限要求,要使得波前测量中引入的斜率误差  $\leq 1.091 \times 10^{-5}$ ,则要求滚转角  $\beta \leq 11.35'$ 。另外,只要俯仰角和偏摆角为小角度( $\alpha, \gamma \leq 30'$ ),即对出射波前的测量没有影响。

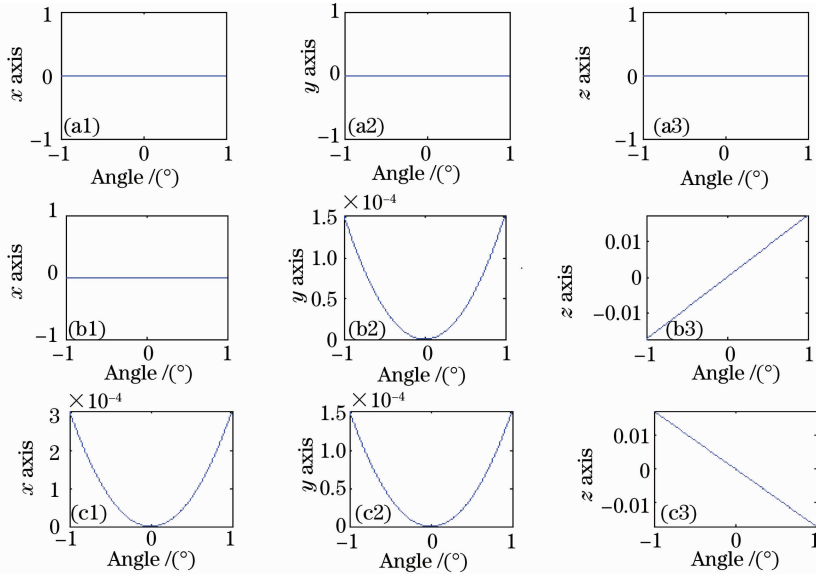


图 4 由偏摆角(a)、俯仰角(b)、滚转角(c)引起的出射光线空间角度变化图

Fig. 4 Light deviation according to the yaw (a), pitch (b), roll (c) angle of the pentaprism

### 4.3 导轨直线度的影响

通过对导轨三维转角的测量可实现对导轨直线度的测量,可以通过测量五棱镜在导轨上的三维转角来反映导轨的直线度。文中 3 个角度都是基于位移传感器 PSD 来测量的,对于俯仰角和偏摆角的测量精度在  $0.2''$  以内<sup>[11,12]</sup>。在长度为 500 mm 的导轨上,在不同时间分别进行了 3 次实验,如图 5 所示。从实验数据来看,重复性较好。测得俯仰角 PV 为  $3.22'$ ,RMS 为  $0.98'$ ,偏摆角 PV 为  $1.16'$ ,RMS 为  $0.32'$ ,滚转角 PV 为  $5.88'$ ,RMS 为  $3.04'$ 。因此实验用导轨的俯仰角、偏摆角、滚转角都小于误差容限,可以忽略。

### 4.4 五棱镜角度误差

对五棱镜进行棱镜展开后计算其第一光学平行差可表示为

$$\theta_1 = (n-1)\Delta 90^\circ - 2n\Delta 45^\circ, \quad (8)$$

(8)式表明  $\Delta 45^\circ, \Delta 90^\circ$  都产生第一光学平行差,主要

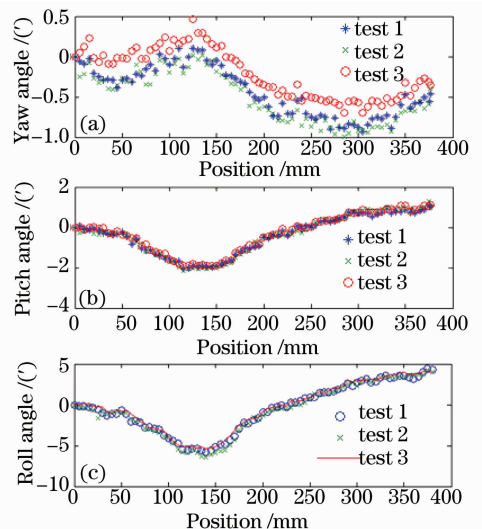


图 5 导轨偏摆角(a)、俯仰角(b)、滚转角(c)测量曲线图

Fig. 5 Measurement of the yaw (a), pitch (b) and roll (c) angle of the rail

引起扫描光束在  $y$  轴方向的转向波前误差且影响很大。当第一光学平行差小于  $\pm 2.25''$  时,可以忽略其对出射波前检测的影响。用精密测角仪测量五棱镜光学平行差为  $2'35.845''$ ,考虑到第一光学平行差在整个测量过程中是不变的,在得到光学平行差后,就可求得由制造角误差引起的光斑在 CCD 靶面上的质心漂移量,在拟合波面的时候减去这个质心漂移量,即相当于对该误差进行了修正。

#### 4.5 五棱镜面形误差

如果五棱镜表面存在面形误差,那么入射平面波经过光学零件后,即使玻璃材料是均匀的,其出射波面也不再是规则的平面波。波面的变形会影响成像质量。一般五棱镜各面的光圈高低是随机的,相互之间可能抵消一部分,实际面形误差引起的角度误差要小于极端情况。五棱镜加工完成以后,其面型误差是固有的定值。可通过在五棱镜前加小孔光阑减小通光口径的方法来减弱面型误差的影响。测

试中应尽量使用五棱镜中心面部分,以减小棱镜面的塌边、勾边对波前测试造成的影响<sup>[13]</sup>。

#### 4.6 空气扰动造成的光斑漂移

在实验过程中,发现接收器件上的光斑并不是稳定的,即使整个实验系统在静止状态下,接收到的光斑仍然会发生漂移。以采样间隔为 30 s 对同一位置采集 80 幅图,得到的光斑质心  $x, z$  方向随时间分布图如图 6 所示,可以看出光斑质心在不断发生变化。 $x, z$  方向的最大漂移量分别为 0.3569, 0.6246 pixel,  $x, z$  方向漂移量的均方根分别为 0.0643, 0.1517 pixel。由此可知水平和垂直方向的质心变化范围不大,水平漂移幅度小于垂直漂移度。这种差别可以归结于近地面大气湍流在水平方向与垂直方向上的差别。光斑漂移源于折射率梯度的变化,振幅在水平方向,只存在随机变化,而在垂直方向,除随机变化外,还存在系统的梯度变化(由空气密度的高度分布造成的)。

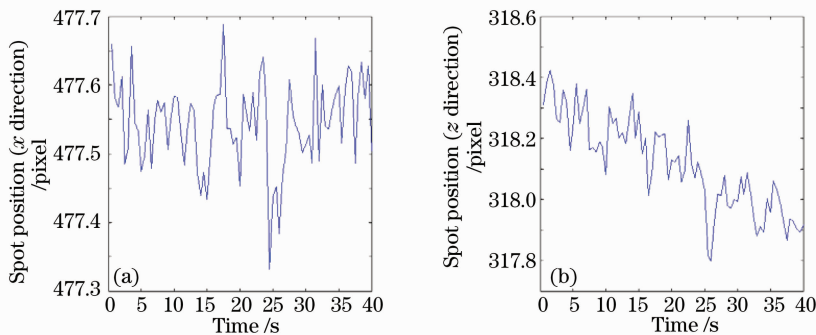


图 6 光斑质心随时间的分布

Fig. 6 Distribution of the spot centroid throughout the testing time

#### 4.7 光斑质心探测误差与对应采样点边缘处最大波前误差的关系

光斑质心探测误差  $\Delta c$  与对应采样点边缘处最大波前探测误差  $\Delta W_{\max}$  的关系<sup>[14]</sup>如图 7 所示。其关系式为

$$\Delta W_{\max} = \frac{\Delta c}{f} \cdot \frac{d}{\lambda} = \frac{\Delta c}{F^\# \lambda}, \quad (9)$$

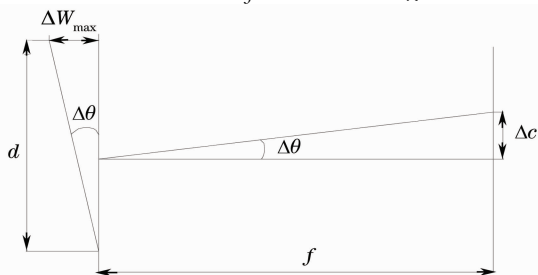


图 7 质心探测误差与波前探测误差的关系图

Fig. 7 Relationship between centroid detection errors and wavefront detection errors

式中  $d$  为子孔径的口径,  $f$  为 CCD 成像物镜的焦距,  $\lambda$  为光束波长,  $F^\#$  为 F 数。

当扫描孔径为方形的情况下,则有

$$\Delta W_{\text{RMS}} = \frac{\Delta c}{\sqrt{12} F^\# \lambda}. \quad (10)$$

由(9)式和(10)式即可估算出波前探测精度。在恒温  $20^\circ\text{C}$  的条件下,在 30 min 的测试周期内,对光斑质心做了 80 次重复测量,光斑质心探测误差的均方根值为  $0.4 \mu\text{m}$ ,则子孔径内波前探测精度约  $\lambda/50$ (RMS)。所以应在每个采样点重复采样求其平均值,以尽量减小光斑质心探测误差对子孔径内波前探测精度的影响。

## 5 结 论

采用五棱镜扫描测试系统对中心波长为 1053 nm 的大口径干涉仪的准直波前进行了检测,

计算得到恢复后的波面矢高为  $1.5\lambda$ , 这个结果是在实时调整准直系统的过程中检测得到的, 说明干涉仪出射波前并未准直。由于扫描检测速度较快, 检测得到的结果可以高效地指导大口径近红外干涉仪准直系统的调整。如果采用更高精度的自动导轨还可实现对大口径的平行光管、望远镜等光学系统的出射波面的高精度检测, 应用前景广阔。

### 参 考 文 献

- 1 Mark Clampin. Status of the James Webb Space Telescope (JWST) [C]. *SPIE*, 2008, **7010**: 70100L
- 2 C. A. Haynam, P. J. Wegner, J. M. Auerbach *et al.*. National Ignition Facility laser performance status[J]. *Appl. Opt.*, 2007, **46**(16): 3276~3303
- 3 Liu Dan, Yan Yan, Ren Bingqiang *et al.*. Scanning Hartmann inspection apparatus[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(9): 1377~1381  
刘丹, 闫岩, 任冰强等. 扫描型哈特曼检测装置研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(9): 1377~1381
- 4 Rao Xuejun, Ling Ning, Wang Cheng *et al.*. Application of Hartmann-Shack sensor in aspheric process [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(4): 491~494  
饶学军, 凌宁, 王成等. 哈特曼-夏克传感器在非球面加工中的应用[J]. *光学学报*, 2002, **22**(4): 491~494
- 5 Luan Zhu, Liu Liren, Liu De'an *et al.*. Double-shearing wavefront testing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(10): 1417~1420  
栾竹, 刘立人, 刘德安等. 双剪切波面干涉测量法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(10): 1417~1420
- 6 Chen Shanyong, Dai Yifan, Xie Xuhui *et al.*. Approach to accuracy evaluation for subaperture stitching interferometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 883~888  
陈善勇, 戴一帆, 解旭辉等. 子孔径拼接干涉测量的精度估计方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 883~888
- 7 Ma Dongmei, Han Changyuan. System design of large flat mirror measurement based on pentagon prism scanning technique [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2007, **30**(11): 90~95  
马冬梅, 韩昌元. 基于五棱镜扫描技术测试大口径平面镜的系统设计[J]. *电子测量技术*, 2007, **30**(11): 90~95
- 8 Chang Shan, Cao Yiping, Chen Yongquan. Amend wave-front errors in measurement on the wave-front of large telescope [J]. *Optical Instruments*, 2005, **27**(6): 17~22  
常山, 曹益平, 陈永权. 大型望远系统波前检测中的波前误差修正[J]. *光学仪器*, 2005, **27**(6): 17~22
- 9 Daniel Malacara. *Optical Shop Testing* [M]. New York: John Wiley & Sons, 2007. 812~821
- 10 J. H. Burge. *Advanced techniques for measuring primary mirrors for astronomical telescopes* [D]. Tucson, Arizona: The University of Arizona, 1993
- 11 K. Tenjimbayashi. Straightness measurement of a moving table using laser beams and quadrant PSDs [C]. *SPIE*, 2002, **4669**: 227~231
- 12 K. Tenjimbayashi. Straightness measurement of a moving table by using laser beams [C]. *SPIE*, 2000, **4093**: 47~57
- 13 Yan Yadong, He Junhua, Cang Yuping *et al.*. Effect of pentaprism error on parallelism detection [J]. *J. Applied Optics*, 2007, **28**(5): 649~653  
闫亚东, 何俊华, 仓玉萍等. 用 ZEMAX 模拟五棱镜误差对平行度检测的影响[J]. *应用光学*, 2007, **28**(5): 649~653
- 14 Peng Su, Yang Yu, Quidong Zhu *et al.*. A self referenced Hartmann testing-radial slope testing [C]. *SPIE*, 2002, **4926**: 140~145